

Исследование эволюции доменной структуры при переключении поляризации кристаллов семейства многоосного релаксорного сегнетоэлектрика магнониобата-титаната свинца

А.Д. Ушаков¹, Q. Hu², X. Liu², Z. Xu², X. Wei², В.Я. Шур¹

¹Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, 620000, Екатеринбург, Россия
bddah@ya.ru

²Лаборатория исследования электронных материалов, Ключевая лаборатория Министерства образования и Международный центр диэлектрических исследований, Сианьский транспортный университет, 710049 Сиань, Китай

В настоящее время из пьезоэлектрических материалов изготавливают большинство электромеханических устройств: преобразователи, датчики и актюаторы, которые широко используют для неразрушающего контроля, медицинской диагностики и терапии, связи и подводной акустики. Электромеханические свойства пьезоэлектрических материалов являются определяющими факторами для работы этих устройств. Для дальнейшего улучшения характеристик пьезоэлектрических материалов необходимо проведение комплексных экспериментальных и теоретических исследований.

За последние два десятилетия монокристаллы релаксорного сегнетоэлектрика магнониобата-титаната свинца $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-}x\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT) привлекли большое внимание научного сообщества, благодаря рекордным пьезоэлектрическим коэффициентам ($d_{33} > 2000$ пм/В) [1]. Недавно было показано, пьезоэлектрические коэффициенты монокристаллов PMN-PT ромбоэдрической фазы, вырезанных перпендикулярно [001], могут быть значительно увеличены переключением переменным электрическим полем, что позволило повысить эффективность электромеханического преобразования [2]. Предполагалось, что улучшение пьезоэлектрических характеристик связано с увеличением размера доменов.

Одной из важнейших прикладных задач является доменная инженерия - создание в сегнетоэлектрических кристаллах стабильных доменных структур заданной геометрии. Обычно такие структуры создают приложением неоднородного электрического поля с помощью соответствующей структуры электродов. Однако, недостаточное исследование особенностей эволюции доменной структуры при переключении поляризации в кристаллах PMN-PT различных фаз затрудняет решение этих проблем.

В работе впервые с использованием *in situ* оптической визуализации и одновременной регистрации тока переключения систематически экспериментально исследована эволюция доменной структуры при переключении поляризации в монокристаллах PMN-PT различных составов и фаз при приложении электрического поля вдоль полярных и неполярных осей. Было показано, что:

1) Переключение поляризации вдоль полярных осей в монодоменных образцах PMN-PT тетрагональной и ромбоэдрической фаз сопровождается тремя конкурирующими процессами эволюции доменной структуры: (1) ростом *a*-доменов, (2) образованием нейтральных и заряженных доменных стенок на пересечении *a*-доменов и (3) ростом *c*-доменов [3, 4].

2) В монокристаллах PMN-PT тетрагональной фазы основной пик тока переключения обусловлен ростом *c*-доменов. Анализ формы тока переключения с использованием модифицированного подхода Колмогорова-Аврами [5] выявил изменение размерности роста доменов, обусловленное переключением в конечном объеме [3].

3) Формирование «двойных» и «тройных» петель диэлектрического гистерезиса в релаксорной фазе в образцах PMN-PT ромбоэдрической фазы при переключении электрическим полем, направленным вдоль [111], объясняется влиянием деполяризующих полей, создаваемых связанными зарядами на фазовых границах [6].

4) Увеличение пьезоэлектрического коэффициента при обработке переменным электрическим полем пластин PIN-PMN-PT ромбоэдрической фазы, вырезанных перпендикулярно [001], обусловлено уменьшением доли замороженной доменной структуры (Рис. 1а-г) при многократном переключении за счет роста линзовидных доменов. Обработка переменным полем позволила получить рекордное значение пьезоэлектрического коэффициента для данных кристаллов ($d_{33} = 2830$ пм/В). Корреляция между полем, соответствующим максимуму тока переключения, и долей замороженной доменной структуры позволила предложить методику оптимизации параметров обработки переменным полем (Рис 1д, е) [7];

5) В пластинах PMN-PT ромбоэдрической фазы, вырезанных перпендикулярно [001], при переключении поляризации формируются структуры полосовых нанодоменов, характерных для моноклинной фазы. Выявлена активационная полевая зависимость характерных времен переключения с полем активации около 1 кВ/мм [8].

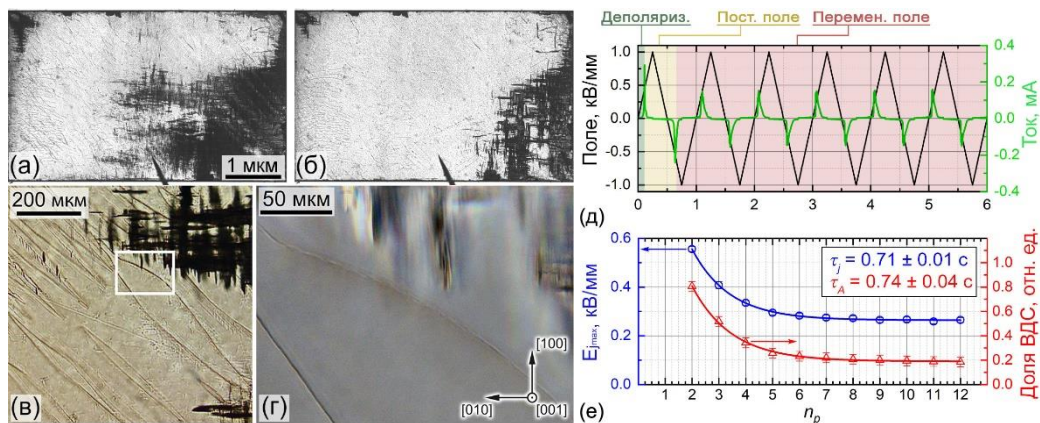


Рисунок 1. Оптические изображения доменной структуры образца, переключенного переменным полем после (а) 4 и (б) 12 импульсов, (в) крестообразная и (г) линзовидная. (д) Зависимости от времени поля и тока переключения. (е) Зависимости от количества импульсов поля, соответствующего максимуму тока переключения (E_{jmax}), и доли площади, занятой замороженными доменами (доля ВДС).

Наибольший интерес представляет дальнейшее изучение эволюции доменной структуры в объёме кристаллов семейства PMN-PT различных фаз при воздействии электрического поля для совершенствования методов доменной инженерии с целью повышения пьезоэлектрического коэффициента и создания регулярной доменной структуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание FEUZ-2020-0054). Использовано оборудование УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ.

1. E. Sun, W. Cao, *Progr. Mater. Sci.* **65**, 124 (2014).
2. C. Qiu, B. Wang, N. Zhang, S. Zhang, J. Liu, D. Walker., Y. Wang., H. Tian, T. R. Shrout, Z. Xu, L.-Q. Chen, F. Li, *Nature* **577**, 350 (2020).
3. A.D. Ushakov, A.A. Esin, A.R. Akhmatkhanov, Q. Hu, X. Liu, Y. Zhao, X. Wei, V.Ya. Shur, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 112902 (2018).
4. A.D. Ushakov, A.A. Esin, A.R. Akhmatkhanov, Q. Hu, X. Liu, Y. Zhao, A.A. Andreev, X. Wei, V.Ya. Shur, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 102903 (2019).
5. V.Ya. Shur, E. Rumyantsev, S. Makarov, *J. Appl. Phys.* **84**, 445 (1998).
6. X. Liu, A.D. Ushakov, Y. Zhao, A.A. Esin, A.R. Akhmatkhanov, X. Wei, Z. Xu, M. Khanuja, S.S. Islam, V.Ya. Shur, *Ferroelectrics* **541**, 66 (2019).
7. A.D. Ushakov, Q. Hu, X. Liu, Z. Xu, X. Wei, V.Ya Shur, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 232901 (2021).
8. A.R. Akhmatkhanov, E.D. Greshnyakov, A.D. Ushakov, E.M. Vaskina, D.O. Alikin, X. Wei, Z. Xu, Z. Li, S. Wang, Y. Zhuang, Q. Hu, V.Ya. Shur, *Ferroelectrics* **508**, 31 (2017).